



⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑩ DE 40 17 935 A 1

⑤ Int. Cl. 5:  
G 01 B 11/30  
G 01 B 11/24

⑳ Aktenzeichen: P 40 17 935.4  
㉑ Anmeldetag: 5. 6. 90  
㉒ Offenlegungstag: 12. 12. 91

DE 40 17 935 A 1

㉓ Anmelder:  
Leonhardt, Klaus, Prof. Dr., 7257 Ditzingen, DE

㉔ Erfinder:  
Antrag auf Nichtnennung

㉕ Mikro-Ellipso-Profilometrie

DE 40 17 935 A 1

## DE 40 17 935 A1

## Beschreibung

## Stand der Technik

Für die Untersuchung und Vermessung von Oberflächen sind einerseits profilometrische Messungen mit Profilometern und andererseits ellipsometrische Messungen mit Ellipsometern bekannt. Optische Profilometer [1], [2], [3] liefern berührungslos ein Höhenprofil einer rauen oder strukturierten Oberfläche, wie es von den gebräuchlichen mechanischen Tastschnittgeräten bekannt ist. Profilometer können jedoch nicht die optischen Konstanten der Oberfläche und daher auch nicht das Oberflächenmaterial bestimmen. Ellipsometrische Messungen liefern auf ebenen Oberflächen mit verschwindender Rauheit die beiden ellipsometrischen Winkel, die die optischen Konstanten und damit das Material der Oberfläche kennzeichnen. Bei bestimmten Auswerteverfahren kann auch der Aufbau von dünnen Schichten auf der Oberfläche bestimmt werden. Ellipsometer können zwar mit "Microspot"-Einrichtungen ausgestattet sein, dann kann auf ebenen Oberflächen verschwindender Rauheit der Verlauf der ellipsometrischen Kenngrößen entlang einer Abtastlinie aufgenommen werden. Ellipsometer können jedoch nicht den Höhenverlauf (Höhentopographie) erfassen.

Mit dem neuen Mikro-Ellipso-Profilometer ist eine eindeutige Interpretation und Vermessung von strukturierten Oberflächen möglich, die aus verschiedenen Materialien zusammen gesetzt sind, oder die Ablagerungen, Oxidationsstellen oder Schichtstrukturen aufweisen. Dabei wird simultan aus ein und demselben mikroskopischen Abtastfleck sowohl profilometrische, als auch ellipsometrische Information gemessen. Daher besteht eine eindeutige räumliche Zuordnung der beiden Messungen, wie sie durch Messungen auf verschiedenen Geräten nicht erzielt werden kann.

Diese neuartigen Meßmöglichkeiten sind insbesondere wichtig bei der Herstellung und Vermessung von mikroelektronischen, mikromechanischen oder metallographischen Strukturen, bei der Untersuchung der Oberflächeneigenschaften von Materialien und Werkstoffen und bei der Fertigung und Kontrolle industrieller Oberflächen, wenn eindeutige Messungen an Materialwechseln notwendig sind. Außerdem können mikroskopische lokale Verschmutzungen, Niederschläge oder chemische Veränderungen unterschieden und nachgewiesen werden.

## Beschreibung der Mikro-Ellipso-Profilometrie

Bild 1 zeigt den Aufbau eines Mikro-Ellipso-Profilometers (MEP). Das Licht einer monochromatischen oder nahezu monochromatischen Lichtquelle (1), insbesondere eines Lasers, wird über die Linse (2) und die Mikrolochblende (3) gesäubert und durch die Linse (4) kollimiert. Über den polarisierenden Strahlenteiler (5), der Viertelwellenlängenplatte in Diagonalstellung (6) und dem elektrooptischen Modulator (Pockelszelle, 7), dessen Hauptachsen parallel und senkrecht zur Ebene des Bildes 1 stehen, läuft der kollimierte Strahl außerachsal durch ein Mikroskopobjektiv mit großer numerischer Apertur. In der Ebene der zu untersuchenden Oberfläche bildet dann der Schwerpunktsstrahl einen Einfallswinkel von 45 Grad oder größer. Das im beugungsbegrenzten Abtastfleck reflektierte Licht läuft über (9), (8), (7) und (6) zum polarisierenden Strahlenteiler zurück und über die Linse 11 zu der CCD-Zeile (12), auf der sowohl die profilometrische als auch die ellipsometrische Information ausgelesen wird. Andere optische Auswerteschaltungen werden weiter unten angegeben.

Zum Verständnis der profilometrischen Signalgewinnung betrachten wir die Intensität des defokussierten Strahlenganges auf der CCD-Zeile. Es sei ein ungestörter Gaußscher Strahl vorausgesetzt, der bei idealer Fokussierung auf der Oberfläche eine sekundäre Strahltaile in F' hat. Zur Profilabtastung wird der Sensorkopf relativ zur Oberfläche in X-Richtung verschoben. Ändert sich dabei die Profilhöhe der Oberfläche, so ändert sich auch die Querausdehnung der Intensitätsverteilung auf dem CCD-Empfänger. Durch den Auswerterechner oder durch einen speziellen Signalprozessor wird ein intensitätsnormiertes gerades Moment  $m_n$ ,  $n = 1/2, 2, 4$ , der Intensität bezüglich der Lateralauslenkung  $x'$  um den Schwerpunkt  $x'_s$ , gebildet. Im einfachsten Fall kann das Moment  $m_{0,5}$  angewendet werden

$$m_{0,5} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - x'_s| I_i}{\sum_{i=1}^N I_i} \quad \text{mit} \quad x'_s = \frac{\sum_{i=1}^N x'_i I_i}{\sum_{i=1}^N I_i} \quad (1)$$

wobei die Intensitäten aus einem bestimmten Bereich von  $\pm N/2$  Pixeln zu beiden Seiten des Schwerpunktes in (1) eingehen. Es sind jedoch auch Momente höherer Ordnung möglich. Für den Fall, daß der Abtastfleck exakt auf die Oberfläche fokussiert ist, nimmt das Moment  $m$  einen bestimmten Wert an, der im Falle einer Autofokussierung für das Abtastobjektiv (9) dem Regler als Sollgröße dient. Im Falle eines Profilometers ohne Autofokussierung des Objektivs wird die Profilhöhe über eine Kalibrierkurve (vgl. (1)) bestimmt. Die Gewinnung genormter Rauheits- und Strukturkennwerte kann in voller Analogie zu den Methoden erfolgen, die in der Rauheits- und Strukturmessung mit dem mechanischen Tastschnittgerät angewendet werden.

Zum Verständnis der ellipsometrischen Meßwertgewinnung betrachten wir die Summenintensität entsprechend dem Nenner in Glg. (1).

## DE 40 17 935 A1

$$I_s = \sum_{i=1}^N I_i$$

Diese Intensität  $I_s$  ändert sich als Funktion der Spannung  $U$ , die am elektrooptischen Modulator EOM angelegt wird. Es läßt sich zeigen, daß

$$I_s = \text{const} \cdot (|m_1|^2 + |m_2|^2 - |m_1| |m_2| \cos(4D + (\arg m_1 - \arg m_2))). \quad (2)$$

ist, mit den komplexen Reflexionskoeffizienten  $m_1$  und  $m_2$  der Prüflingsoberfläche und mit der relativen Phase  $D$  des EOMs:

$$D = (\pi U)/(2 U_{\text{Sperr}}) \quad (3)$$

$U_{\text{Sperr}}$  ist die Sperrspannung des EOMs (Lambda-viertel-Spannung bei Anwendung des EOMs als Pockelszelle). Der gesuchte ellipsometrische Kennwert  $\psi$  ist nach Definition [4]:

$$\tan \psi = |m_1|/|m_2| \quad (4)$$

Damit wird nach Bildung des Kontrastausdruckes  $K$  nach der Definition von Michelson,

$$K = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}})/(I_{\text{max}} + I_{\text{min}}) \quad (5)$$

aus dem Ausdruck für  $I_s$  nach Glg. (2):

$$\tan \psi = (1 - \sqrt{1-K^2})/K \quad (6)$$

Somit kann der ellipsometrische Winkel  $\psi$  leicht für jeden Abtastpunkt gebildet werden. Der zweite ellipsometrische Winkel,  $\Delta$ , ist in der Ellipsometrie definiert als

$$\Delta = \arg(m_1) - \arg(m_2) \quad (7)$$

Das Mikro-Ellipso-Profilometer liefert  $\Delta$  aus dem speziellen Wert der relativen Phase  $D_{\text{max}}$  nach (3), für den die Intensität ein Maximum annimmt:

$$\Delta = 4 D_{\text{max}} = (2 \pi U_{\text{max}})/U_{\text{Sperr}} \quad (8)$$

Durch Messung von  $U_{\text{max}}$  bei bekanntem  $U_{\text{Sperr}}$  kann somit auch der zweite ellipsometrische Winkel leicht bestimmt werden. Damit ist gezeigt, daß die volle ellipsometrische Information durch das neue Mikro-Ellipso-Profilometer gewonnen werden kann. Bemerkenswert ist, daß weder für die profilometrischen Messungen, noch für die ellipsometrischen Messungen eine mechanische Bewegung von Bauteilen stattfinden muß. Es wird lediglich die Spannung am EOM vom Rechner gesteuert verändert und die Intensitäten auf der CCD-Zeile ausgewertet.

Bild 2 zeigt typische Messungen, die mit einem Mikro-Ellipso-Profilometer möglich werden. Es handelt sich um die Oberfläche eines Silizium Photodetektors. Dabei findet ein Materialwechsel von Silizium auf Gold und wiederum auf das Substrat statt. Das Höhenprofil, Bild 2a, ist vor. nicht vermeidbaren Führungsfehlern des Abtastisches im nm-Bereich überlagert.

Aus dem Höhenprofil allein können die Stellen des Materialwechsels nicht eindeutig entnommen werden. Aus dem Profil des ellipsometrischen Winkels  $\Delta$ , Bild 2b, sind jedoch die Materialwechsel durch signifikante Sprünge deutlich zu erkennen. Außerdem kann bei unbekannten Materialien aus den gemessenen Werten von  $\psi$  und  $\Delta$  auf das Material geschlossen werden. Wie aus Bild 2b zu sehen ist, gehen die Führungsfehler des Abtastschlittens nicht in die Messungen von  $\psi$  und  $\Delta$  ein.

## Modifikationen des Aufbaues

Folgende Modifikationen dienen der Verbesserung der und Miniaturisierung des Gerätes bei gleichem Anwendungszweck.

Bild 3 zeigt eine andere Möglichkeit der Meßwertgewinnung. Das Abtaststrahlenbündel wird durch das Objektiv 11 fokussiert und einer modifizierten Lichtwaage (vergl. [1]) zugeführt. Über den Strahlenteiler 13 gelangt das Licht durch Reflexion zu dem Photodetektor 16, der ohne Mikrolochblende unabhängig vom Objektabstand stets dieselbe Intensität mißt. Das vom Strahlenteiler 13 durchgelassene Licht fällt auf die Mikrolochblende 14 und den Photodetektor 15, so daß sich das Detektorsignal in Abhängigkeit von der Entfernung des Oberflächenelementes ändert. Der Quotient  $S_{15}/S_{16}$  der beiden Detektorsignale kann im einfachsten Falle nach einer Kalibrierung (vergl. [1]) als Maß für die Profilhöhe verwendet, oder einer Autofokussierung zugeführt werden. Das ellipsometrische Signal  $I_s$  kann über den Detektor 16 direkt gemessen werden.

Eine weitere Möglichkeit der Detektion ist durch eine Anordnung gegeben, wie sie in der Compact-Disk

## DE 40 17 935 A1

Technologie und für die Profilometer nach [2] und [3] angewendet wird. Das ellipsometrische Signal  $I_s$  kann in diesem Falle durch die Summe der Signale aller vier Einzeldetektoren gebildet werden.

Eine wichtige Modifikation ist durch die Anwendung des Doppelpaß-Prinzips möglich, wie es für die Profilometrie durch [5] angemeldet wurde. Dies ist mit dem in Bild 4 gezeigten, modifizierten Aufbau für die Mikro-Ellipso-Profilometrie möglich. Der Abtaststrahl durchläuft wie im Falle des Einfach-Passes nach Bild 1 den polarisierenden Strahlenteiler 5, die Lambda-viertelplatte 6, den Elektrooptischen Modulator 7, das Abtastobjektiv 9 und nach der ersten Reflexion am Meßobjekt 10 weiter die Folge der Bauteile 9 und 7, bis zu dem Doppelpaßspiegel 17 in Bild 4. Von 17 wird der Strahl in sich selbst zurückreflektiert und läuft nach Durchgang durch 7 und 9 zum zweiten Mal über das Meßobjekt 10 und von dort zum vierten Mal durch den Elektrooptischen Modulator, zum zweiten Mal durch die Lambda-viertelplatte und wird durch den polarisierenden Strahlenteiler in den Detektorraum reflektiert. Durch den zweimaligen Übergang über die zu messende Oberfläche verstärken sich die Meßeffekte und es ergibt sich doppelte Meßempfindlichkeit. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist, daß sich die notwendige Spannung am Modulator zur Einstellung der Meßbedingungen für die Ellipsometrie durch den viermaligen Durchgang durch den Elektrooptischen Modulator halbieren. Außerdem findet eine Steigungskompensation für die profilometrische Messung statt.

Ordnet man den polarisierenden Strahlenteiler 5, die Lambda-viertelplatte 6 und den Doppelpaßspiegel 17 auf einer Querverschiebeinheit an (strichpunktiert umrahmt in Bild 4a und -b), so kann von der Doppelpaß- zur Einfachpaß-Detektion und umgekehrt leicht übergegangen werden (Bild 4b). Der Vorteil der Einfachpaß-Detektion ist ein verringerter Streulichtpegel, der für Oberflächen mit niedlerem Reflexionsgrad wie z. B. Glas wichtig ist.

## Literatur

- [1] K. Leonhardt, K.-H. Rippert und H. J. Tiziani, Optische Mikroprofilometrie und Rauheitsmessung, Technisches Messen, tm, 54 (1987) S. 243—252.
- [2] N. N., Rodenstock Rm 600 Laser Stylus, Informationsblätter der Optischen Werke G. Rodenstock, München, 1988.
- [3] N. N., UB 16 — Das optische Präzisions-Längenmeßsystem, Informationsblätter der Ulrich Breitmeier Meßtechnik GmbH, Ettlingen.
- [4] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, Ellipsometrie and Polarized Light, North Holland, Amsterdam, 1977.
- [5] P 37 16 961.0, Vorrichtung zur berührungslosen Abtastung einer Oberfläche.

## Patentansprüche

1. Gerät und Verfahren zur gleichzeitigen berührungslosen Messung des Höhenprofils und der ellipsometrischen Profile strukturierter und rauher Oberflächen, dadurch gekennzeichnet, daß der Abtaststrahl durch einen polarisierenden Teiler (5), eine Lambda-viertelplatte (6) und einen elektrooptischen Modulator (7) in seiner Polarisation gesteuert werden kann und das Objekt (10) mit dem beugungsbegrenzten Fokus dieses Abtaststrahles, durch ein Abtastobjektiv (9) abgetastet wird, wobei die Strahlachse des Abtaststrahles mit der Oberflächennormale einen Winkel von größer als ca 45° bildet und das reflektierte Licht durch dasselbe Abtastobjektiv (9) wieder aufgefangen wird, wieder durch den Elektrooptischen Modulator, die Lambda-viertelplatte zurückläuft, und durch Reflexion an dem polarisierenden Teiler (5) zu einer Photodetektoranordnung, insbesondere einem CCD-Empfänger (12), gelangt, deren Signale in Abhängigkeit von der Spannung am Elektrooptischen Modulator (7) durch Auswertung in einem Minicomputer oder einem Mikroprozessor die zu messende Information des Höhenprofils und der ellipsometrischen Profile ergeben.
2. Mikro-Ellipso-Profilometer nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß der Abtaststrahl in der Eintrittspupille (8) des Abtastobjektives (Mikroskopobjektives) (9) achsial versetzt ist, so daß die Strahlachse im Objektraum einen Winkel  $\alpha$  mit der Oberflächennormale bildet, der für die ellipsometrischen Messungen notwendig ist.
3. Mikro-Ellipso-Profilometer nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß als Photodetektor eine CCD-Zeile (12) verwendet wird, und durch die Auswertung der Momente der Intensität auf der Zeile das Höhenprofil des Prüflings berechnet werden kann.
4. Mikro-Ellipso-Profilometer nach Anspruch 3 dadurch gekennzeichnet, daß die ellipsometrischen Winkel durch die Gesamtintensität auf der CCD-Zeile in Abhängigkeit von der Spannung  $U$  am Elektrooptischen Modulator nach Gleichung (6) und (8) berechnet werden.
5. Mikro-Ellipso-Profilometer nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß die Lambda-viertelplatte mit ihren Hauptachsen in Diagonalstellung zu der Einfallsebene des polarisierenden Strahlenteilers steht, und die Hauptachsen des Elektrooptischen Modulators parallel und senkrecht zu dieser Ebene.
6. Mikro-Ellipso-Profilometer nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß als Photodetektoranordnung eine modifizierte Lichtwaage nach Bild 3 mit dem Strahlenteiler (13), dem intrafokalen Detektor (15) mit der Lochblende (14) und dem Detektor (16) ohne Lochblende verwendet wird. Das ellipsometrische Signal wird dabei durch den Detektor (16) aufgenommen.
7. Mikro-Ellipso-Profilometer nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß als Photodetektoranordnung ein Glaskeil und zwei Doppeldioden nach [2] und [3] verwendet werden. Das ellipsometrische Signal wird dabei durch die Summe  $S_1 + S_2 + S_3 + S_4$  gewonnen.
8. Mikro-Ellipso-Profilometer mit doppeltem Übergang über die Oberfläche (Doppelpaß) nach Bild 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Abtaststrahl über den polarisierenden Strahlenteiler 5, die Lambda-viertelplatte 6 und den Elektrooptischen Modulator 7 durch das Abtastobjektiv 9 über die Oberfläche läuft,

## DE 40 17 935 A1

nach der Reflexion wieder durch das Objektiv und den Elektrooptischen Modulator zu dem Doppelpaßspiegel 17 gelangt, von wo es über die Folge der Bauteile 7, 9, 10, 9, 7, 6 wieder zum polarisierenden Strahlenteiler 5 und von dort zu einer der Photodetektoranordnung nach Anspruch 1, 3, 5 oder 6 gelangt.  
9. Mikro-Ellipso-Profilometer nach Anspruch 1 und 8 dadurch gekennzeichnet, daß durch Verschieben der Bauteilgruppe 5, 6 und 17 (gestrichelt umrahmt in Bild 4) ein Wechsel von Einfach- zu Doppelpaß-Detektion möglich wird.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

10  
15  
20  
25  
30  
35  
40  
45  
50  
55  
60  
65

ZEICHNUNGEN SEITE 1

Nummer:  
Int. Cl. 5:  
Offenlegungstag:

DE 40 17 935 A1  
G 01 B 11/30  
12. Dezember 1991

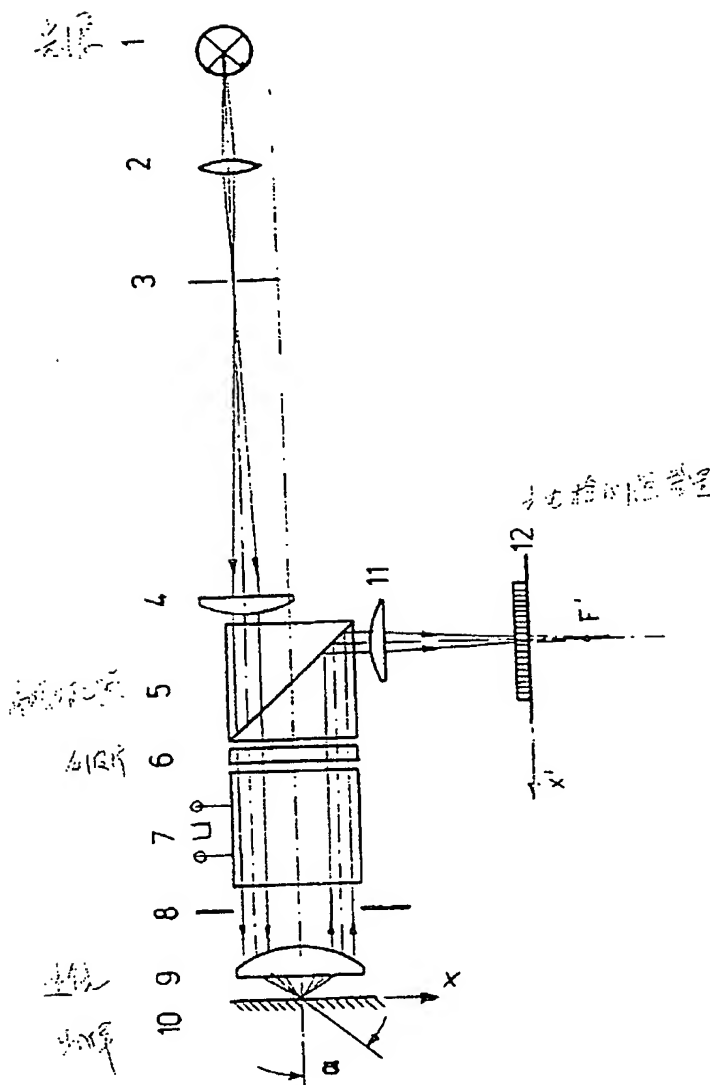


Bild 1

108 050/42

ZEICHNUNGEN SEITE 2

Nummer:

DE 40 17 835 A1

Int. Cl. 8:

G 01 B 11/30

Offenlegungstag:

12. Dezember 1991

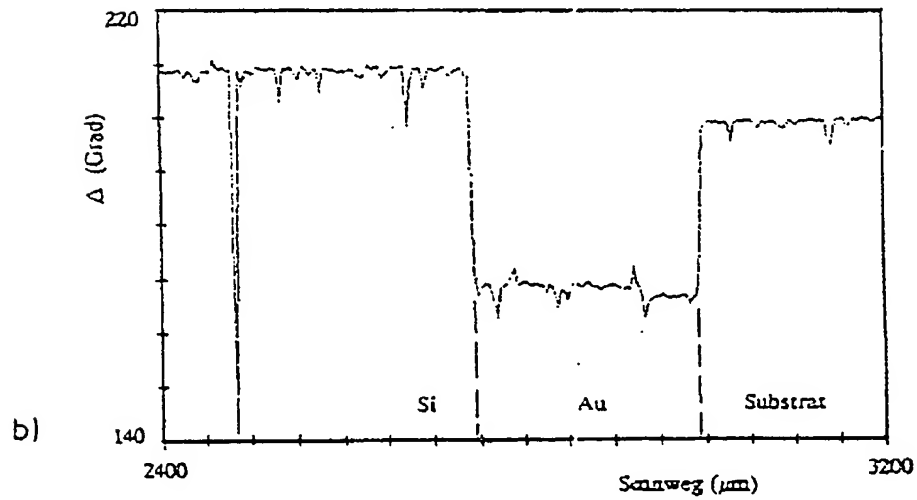
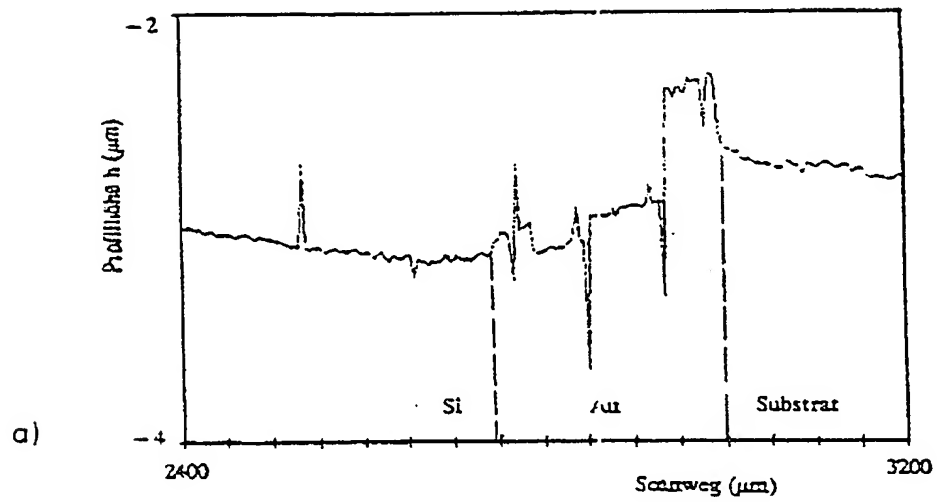


Bild 2

108 050/42

ZEICHNUNGEN SEITE 3

Nummer:

DE 40 17 935 A1

Int. Cl.<sup>8</sup>:

G 01 B 11/30

Offenlegungstag:

12. Dezember 1991

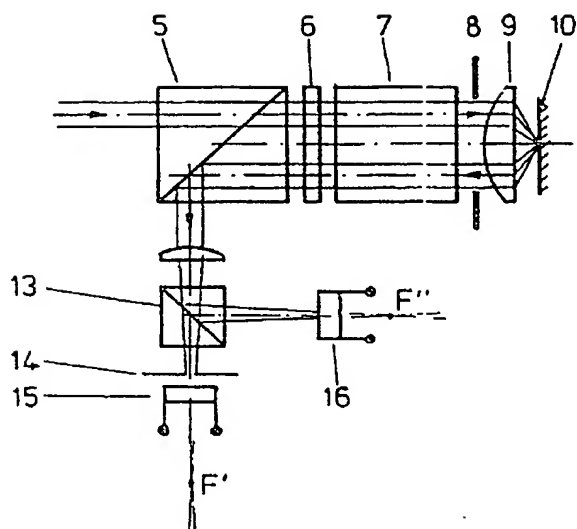


Bild 3

108 050/42



ZEICHNUNGEN SEITE 4

Nummer:  
Int. Cl.<sup>8</sup>:  
Offenlegungstag:

DE 40 17 835 A1  
G 01 B 11/30  
12. Dezember 1991

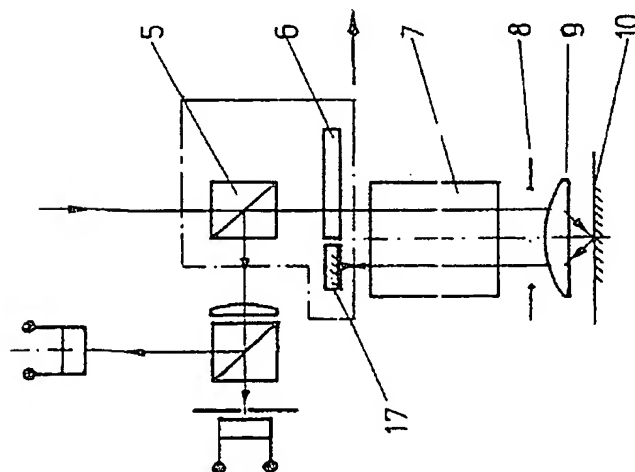
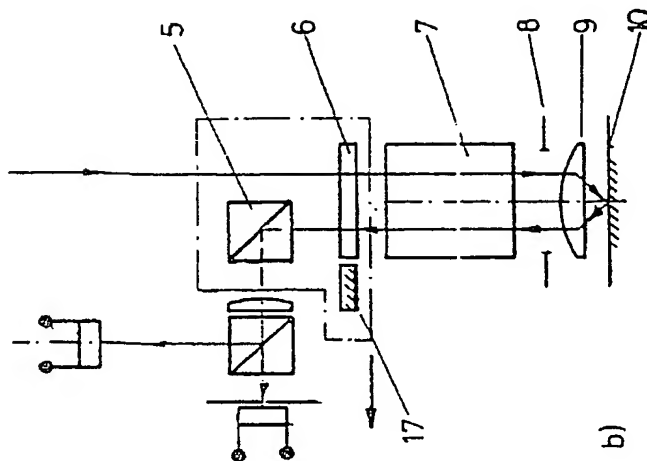


Bild 4 a)

108 050/42

12/19/2006 17:45 FAX 858 597 1585

MCDERMOTT, WILL & EMERY

041/077